

À l'échelle microscopique, on obtient une surface rugueuse en modifiant de façon systématique une surface moyenne. On décrit les perturbations soit par une fonction aléatoire qui possède des propriétés statistiques données, soit par une carte détaillée des structures microscopiques de la surface.

Au XVIII<sup>e</sup> siècle, le géophysicien français Pierre Bouguer a étudié le premier les reflets des surfaces rugueuses. Il pensait qu'une surface était un assemblage de nombreuses facettes microscopiques, ou «microfacettes». La quantité de lumière réfléchie vers un observateur dépendait de la proportion de microfacettes alignées de sorte qu'elles réfléchissent la lumière de la source vers l'observateur. Bouguer espérait expliquer la loi de Lambert, qui décrit l'apparence des surfaces mates, en construisant un arrangement de microfacettes qui réfléchirait la lumière de la même manière dans toutes les directions, mais il n'y parvint pas.

Toutefois, les microfacettes se sont imposées pour la représentation des surfaces spéculaires ou brillantes. Les simulations infographiques de la réflexion spécifient directement la répartition des orientations de microfacettes. Le plus souvent, on utilise une répartition simple : un paramètre de rugosité définit le degré de déviation

des microfacettes par rapport à la forme générale de la surface.

Même pour des surfaces brillantes, les techniques fondées sur la répartition des microfacettes ont leurs limites. Par exemple, lorsqu'un rayon lumineux atteint une surface rugueuse avec un angle d'incidence faible, les reliefs engendrent une ombre importante, qui change radicalement l'apparence de la surface. Or, ces effets d'ombre de la surface sur elle-même sont difficiles à calculer. Lorsque la longueur d'onde du rayon lumineux devient comparable à la taille des microreliefs, le problème est encore plus ardu : le modèle de réflexion de Bouguer n'est plus applicable, car les effets ondulatoires, telles la diffraction et les interférences, interviennent.

### Prendre le problème en profondeur

Pour de nombreux matériaux, la réflexion ne se résume pas à la simple interaction de la lumière avec la surface, c'est-à-dire avec l'interface de l'air et du matériau. Des interactions à l'intérieur du matériau entrent en jeu. Ce phénomène de dispersion sous la surface est courant dans les matériaux organiques, tels les plastiques. La profondeur d'interaction de la lumière est comprise entre

quelques micromètres (dans le cas de la peinture et d'autres enduits) et plusieurs millimètres (dans le cas de la peau ou du marbre).

Lors d'une réflexion sous la surface, la lumière pénètre au sein du matériau. À l'intérieur, la lumière est diffusée et absorbée par les constituants du milieu, atomes ou molécules. Ce phénomène est comparable à l'interaction de la lumière avec une nappe de brume constituée de gouttelettes d'eau. Une partie de la lumière diffusée revient à la surface et ressort du milieu, donnant à l'observateur l'impression qu'ils s'agit de lumière réfléchie. La plupart des diffusions dévient la lumière d'un angle bien inférieur à 90 degrés, et de nombreuses diffusions de ce type sont parfois nécessaires pour renvoyer la lumière vers l'extérieur. Quand le nombre de déviations est grand, avant l'absorption de la lumière, la direction de propagation de la lumière devient aléatoire. Ce mécanisme, qui explique pourquoi la lumière ressort du matériau suivant une direction aléatoire, est celui que traduit la loi de Lambert.

Les physiciens ont d'abord mis au point la théorie de la dispersion dans les milieux stratifiés afin d'expliquer le transport radiatif (le mouvement de la chaleur et de la lumière par rayonnement) dans les atmosphères solaires



**3. LE RUISSELLEMENT DE LA PLUIE** modifie l'apparence des matériaux. À l'aide d'un algorithme qui décrit l'écoulement des particules d'eau sur une surface (ci-dessus au centre), on simule l'altération d'une Vénus de Milo couverte de poussière (ci-dessus à droite) et d'une façade (à droite).



Images : Julie Dorsey, Hans Pedersen et Pat Hamman

et planétaires. Cette théorie a été reprise et étendue par des informaticiens intéressés par l'apparence de la peinture, de la peau, de la végétation et des océans. Ces modèles ont été récemment adaptés à l'infographie. Leur efficacité

et leur universalité est remarquable : ils décrivent aussi bien un mur fraîchement peint que les nuances du teint d'un visage humain, qui sont respectivement les textures les plus simples et les plus complexes à modéliser.

Ceux qui ont déjà acheté de la peinture savent que la peinture de couleur se prépare à partir de peinture blanche. La blancheur de la peinture blanche lui est conférée par du dioxyde de titane, qui diffuse très bien la lumière et ne l'absorbe presque pas. Lorsque la lumière tombe sur une surface peinte en blanc mat, les rayons lumineux pénètrent dans la couche de peinture et sont diffusés par les particules de dioxyde de titane en suspension dans le liant avant de ressortir de la peinture. La blancheur de la surface résulte de la très faible absorption de la lumière et de l'égale restitution des différentes longueurs d'onde du domaine visible. Les multiples diffusions, à l'intérieur de la peinture, font perdre à la lumière la mémoire de sa direction initiale : la direction résultante est aléatoire, ce qui donne l'aspect mat.

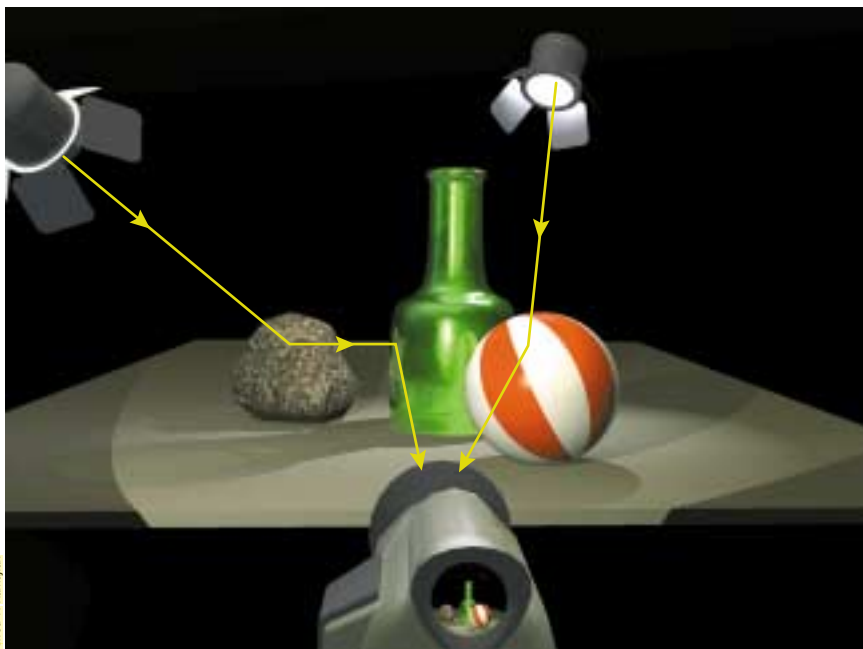
Une peinture de couleur s'obtient par le mélange d'une petite quantité de pigment à la peinture blanche. Ces pigments sont des composés qui absorbent certaines longueurs d'onde. Puisque les pigments sont en suspension dans un milieu diffusant presque parfait, la lumière finit par interagir avec un pigment et elle est partiellement absorbée : la lumière qui ressort a la couleur qui correspond aux longueurs d'onde qui n'ont pas été absorbées. Ce mécanisme a été modélisé pour la première fois par Paul Kubelka et Franz Munk en 1931. En supposant que le milieu contient des particules qui dispersent et absorbent la lumière de manière isotrope, ils déduisaient la couleur et l'intensité de la lumière ressortant du milieu selon son épaisseur et sa concentration en pigment.

Le modèle Kubelka-Munk est le modèle de réflexion sous la surface le plus simple et le plus utilisé. Toutefois, comme il suppose une diffusion isotrope, il ne s'applique qu'aux matériaux mats. Pour prendre en compte la réflexion dans des directions privilégiées, comme c'est le cas des surfaces brillantes, on a mis au point d'autres modèles où l'on sépare la lumière en deux composantes. La première correspond à la lumière qui ressort du matériau après une diffusion unique, et la seconde correspond au reste de la lumière, qui subit de multiples diffusions. Comme dans le modèle Kubelka-Munk, on suppose que la lumière diffusée plusieurs fois obéit à la loi de Lambert, alors que la lumière issue d'une diffusion unique



Julie Dorsey, Alan Edelman, Henrik Jensen, Justin Legakis et Hans Pedersen

**4. L'USURE D'UN SPHINX DE GRANIT est simulée à l'aide d'une coque épaisse (car-touche).** On a calculé comment l'eau et les molécules qui y sont dissoutes pénètrent la coque et réagissent chimiquement avec la pierre ; simultanément, des sels recristallisent dans la croûte érodée.



Alfred T. Kanajian

**5. L'INTERACTION DE LA LUMIÈRE avec son environnement doit être simulée pour obtenir des images informatiques réalistes.** L'environnement comprend des sources lumineuses, des objets et des caméras qui observent la scène. La simulation doit prendre en compte la réflectivité des surfaces et l'absorption de la lumière par les métaux.

est renvoyée selon la loi de diffusion de la particule concernée.

À l'aide de ces idées, nous avons modélisé la peau et résolu aussi un problème important de l'infographie. Le rendu de la peau est particulièrement difficile, à la fois parce qu'elle possède une structure complexe et parce que le système de vision humain a acquis une aptitude particulière pour discriminer les visages : nous obtenons un aspect plus proche de la réalité que pour les autres objets. Les modèles de diffusion sur des couches superposées surmontent ces difficultés avec efficacité.

La peau humaine est constituée de deux couches principales : le derme, à l'intérieur, et l'épiderme à l'extérieur. Le derme contient beaucoup de sang, ce qui le rend rouge. L'épiderme, beaucoup plus mince, contient de la mélanine qui, selon sa concentration, rend la peau claire, brune ou noire. De surcroît, l'épiderme peut être recouvert d'huile, de saleté ou de produits cosmétiques.

Afin d'engendrer des visages réalistes, nous choisissons les concentrations de sang et de mélanine, ainsi que les épaisseurs relatives du derme

et de l'épiderme. Par exemple, la mineur de la couche d'épiderme, sur les lèvres, explique que ces dernières sont plus rouges que le reste du visage. Les taches de rousseur sont modélisées par des «éclaboussures» de mélanine réparties aléatoirement sur les joues (voir la figure 2).

## La simulation de la corrosion

Aux débuts de l'infographie, les modèles étaient idéalisés : on négligeait les changements dus à l'environnement et au temps. Toutefois, l'aspect des objets est déterminé par les phénomènes de vieillissement : les murs en brique patinés par les ans, les métaux rouillés, les pierres recouvertes de mousse, les poutres desséchées et fendillées résultent de phénomènes physiques, chimiques ou biologiques : corrosion, érosion, croissance biologique, sédimentation... L'évolution d'un matériau dépend étroitement de sa structure ; la pierre, le bois et les métaux évoluent différemment, parce qu'ils ont des structures distinctes. Les

méthodes de préparation, comme la taille, le polissage ou la teinture, ont également une influence. Depuis quelques années, nous simulons des mécanismes qui modifient l'aspect des matériaux d'abord en identifiant le phénomène physique à l'origine d'une modification spécifique de l'apparence, puis en élaborant les modèles appropriés.

Les patines métalliques sont un exemple classique de modification de l'apparence d'un matériau par interaction avec son environnement. Une patine est une pellicule sur une surface, qui résulte de la modification chimique de la surface, ou bien de l'adjonction ou de la disparition de matière. Les patines apparaissent naturellement, par corrosion atmosphérique (comme la pluie), ou artificiellement, par la peinture ou d'autres traitements de surface. La composition d'une patine et sa vitesse de croissance dépendent de l'environnement. Par exemple, les patines croissent en général plus vite en ville qu'à la campagne, car l'air contient plus de composés soufrés.

L'un de nos modèles reproduit la formation des patines de cuivre. La

## La modélisation de la réflexion

La manière dont une surface réfléchit la lumière peut être caractérisée par une «fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle». Cette fonction mathématique définit la proportion de la lumière qui est réfléchie dans les diverses directions de l'espace, en fonction de la direction d'incidence.

La plus ancienne loi de réflexion, connue des Grecs anciens, stipule que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence. La distribution de réflectance bidirectionnelle est nulle dans toutes les directions, excepté dans l'unique direction où toute la lumière repart.

La loi de Lambert décrit la réflexion sur les surfaces mates : la lumière se réfléchit de manière isotrope, quelle que soit la direction de la lumière incidente. La loi de Lambert est un bon exemple de modèle phénoménologique, car elle rend bien compte de l'apparence de matériaux mats, comme le carton, sans description du mécanisme physique à l'origine de cette redistribution de la lumière. Entre ces deux extrêmes que sont les miroirs parfaits et les surfaces mates, les surfaces brillantes ont des distributions de réflectance qui considèrent une réflexion autour d'une direction principale.



Mesure de la réflectance d'un objet.

Depuis des années, les spécialistes de l'optique et des radars, ainsi que certains spécialistes des matériaux mesurent directement les distributions de réflectance des matériaux. De telles mesures ont certainement joué un rôle important dans la conception des avions furtifs.

Les distributions des réflectances intéressent également la télédétection : l'apparence des forêts et des champs, entre autres, varie en fonction de l'angle du Soleil et de l'angle d'observation du satellite. C'est un problème inverse de la simulation de l'apparence d'un matériau : il s'agit d'identifier un matériau à partir de son apparence.

Des instruments mesurent les distributions de réflectance (voir la figure ci-contre). Une source lumineuse éclaire un échantillon placé au centre de l'appareil. Un photomètre se déplace tout autour de l'échantillon et mesure la lumière réfléchie dans chaque direction. Afin d'obtenir la réflectance du matériau étudié dans tout l'espace, on répète les mesures en modifiant la position de la source lumineuse. Les fonctions de réflectance déjà connues ne sont pas encore utilisées à grande échelle en infographie, mais plusieurs groupes examinent cette approche.

Marc Levoy, Brian Curless, Szymon Rusinkiewicz et Duane Fulk, Stanford University